

**Associação do regime hidrológico do rio xingu com oceanos adjacentes em eventos extremos utilizando dados altimétricos****Association between xingu river hydrological regime with adjacent oceans in extreme events using altimetry data**

DOI:10.34117/bjdv5n11-339

Recebimento dos originais: 07/10/2019

Aceitação para publicação: 28/11/2019

**Mylena Vieira Silva**

Mestre e Clima em Ambiente pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia.

Instituição: Marinha do Brasil

Endereço: Rua Cmte. Ituriel, s/n - Fluminense, São Pedro da Aldeia - RJ, 28944-054

Email: mylenavieirasilva@gmail.com

**Adrien Paris**

Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) e em Geofísica, Oceanografia e Hidrologia Espacial no Laboratório de Estudos em Geofísica e Oceanografia Espacial (LEGOS) na Universidade Toulouse III Paul Sabatier (UPS-UT3) na França.

Instituição: Collect Localisation Satellites

Endereço: Parc Technologique du Canal, 11 Rue Hermès, 31520 Ramonville-Saint-Agne, França

Email: a paris@cls.fr

**Stéphane Calmant**

Doutor em Ciência Geofísica Espacial pela Université Toulouse 3 - Paul-Sabatier, Toulouse, França. Atualmente é diretor do Institut de Recherche pour le Développement.

Instituição: Institut de recherche pour le développement, Marseille, França.

Endereço: 44 Boulevard de Dunkerque, 13002 Marseille, França

Email: stephane.calmant@ird.fr

**Luiz Antonio Cândido**

Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Instituição: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus - AM, Brasil.

Endereço: Av. André Araújo, 2936 - Petrópolis, Manaus - AM, 69067-375

Email: luiz.antonio.candido@gmail.com

**Joecila Santos da Silva**

Doutor em Ciências pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e a Université Toulouse 3 - Paul Sabatier, Toulouse, França.

Instituição: Universidade do Estado do Amazonas, Manaus - AM, Brasil.

Endereço: Av. Darcy Vargas, 1.200 - Parque Dez de Novembro, Manaus - AM, 69050-020

Email: jsdsilva@uea.edu.br

**RESUMO**

Nas últimas décadas, eventos hidrológicos extremos afetaram a bacia Amazônica causando danos sociais e econômicos, abalando diretamente a população que vive nas comunidades ao longo desses rios, dificultando a navegação, agricultura, geração de hidroeletricidade e até mesmo a falta de alimentos. O sudoeste da Amazônia é fortemente influenciado pelas variações que ocorrem na Temperatura da Superfície do Mar (TSM) dos oceanos Pacífico e Atlântico. Em virtude da carência de dados na região, foram utilizados dados de Altimetria Espacial para descrever o regime hidrológico desse rio e correlacionar as anomalias mensais de níveis de água com os índices de TSM entre 2003 e 2015. De modo geral, o rio Xingu apresenta forte correlação tanto com o Pacífico Equatorial, como com Atlântico Norte e Sul. Os eventos hidrológicos extremos de 2009 e 2014 na região do Xingu foram associados às alterações nas anomalias de TSM, no Atlântico Tropical Norte e Sul.

**Palavras-Chave:** Altimetria espacial, extremos hidrológicos, bacia do Xingu.

**ABSTRACT**

In the last decades, extreme hydrological events have affected the Amazon basin causing social and economic damages, directly affecting the population living in the communities along these rivers, hindering navigation, agriculture, hydroelectricity generation and even lack of food. The southwest of the Amazon is strongly influenced by the variations that occur in the Sea surface temperature (SST) of the Pacific and Atlantic Oceans. Due to lack of data in the region, spatial altimetry data were used to describe the hydrological regime of this river and to correlate the monthly anomalies of water levels with the SST indexes between 2003 and 2015. In general, the Xingu River presents strong correlation with both the Equatorial Pacific and the North and South Atlantic. The extreme hydrological events of 2009 and 2014 in the Xingu region were associated with changes in SST anomalies in the North and South Tropical Atlantic.

**Keywords:** Altimetry data, hydrological extreme, Xingu basin.

**1 INTRODUÇÃO**

Comunidades das mais diferentes regiões do planeta estão vulneráveis, em maior ou menor escala, a situações naturais adversas. Na região Amazônica tem-se observado uma exacerbação do ciclo sazonal de enchente e vazantes em seus rios nas últimas décadas causando danos sociais e econômicos, afetando diretamente a população que vive nas comunidades ao longo desses rios, dificultando a navegação, agricultura, geração de hidroeletricidade e até mesmo a falta de alimentos. Em 2014 e 2015, o Sudoeste da Amazônia sofreu uma grande cheia, quando os níveis do rio Madeira e rio Branco alcançaram níveis recordes, inundando cidades, fazendas e estradas, impedindo a pesca e isolando moradores (Espinoza *et al.*, 2014).

De acordo com *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) as chuvas e vazões de rios na Amazônia apresentam variabilidades associadas às mudanças dos padrões de variação nas mesmas escalas de tempo nos oceanos Pacífico e Atlântico (IPCC, 2016). A variabilidade interanual está associada ao El Niño Oscilação Sul (ENOS) e a Oscilação do Atlântico Norte (*North Atlantic Oscillation* – NAO). Já as variabilidades interdecenal e decenal estão associadas com a Oscilação Decenal do Pacífico (*Pacific Decadal Oscillation* – PDO) no Pacífico, e com a Oscilação

Multidecenal do Atlântico (*Atlantic Multidecadal Oscillation* – AMO), no Atlântico. Yoon & Zeng (2010), mostram que a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Atlântico Tropical pode desempenhar um papel significativo na determinação da variabilidade interanual das chuvas na Amazônia, particularmente durante a estação seca. Segundo os autores, o Pacífico Tropical tem maior correlação durante a estação chuvosa da Amazônia. Já a correlação com o Oceano Atlântico Sul Tropical é mais fraca, mas é mais significativa durante o período de transição. A influência do ENOS é mais forte ao longo de toda a bacia (com sua influência máxima para a foz do rio), especialmente durante a estação chuvosa. A influência do Atlântico Norte sobre a bacia Amazônica pode ser comparada aos efeitos produzidos pelo mesmo, ou seja, possui potencial de induzir a região a grandes eventos de secas ou cheias, de forma que, o aumento (redução) da precipitação sobre a bacia está associado com TSM anormalmente quente (fria) no Atlântico Sul Tropical, juntamente com SST anormalmente fria (quente) no Atlântico Norte Tropical.

Em certos pontos da bacia Amazônica a rede de observação meteorológica e hidrológica é extremamente escassa ou praticamente inexistente devido, principalmente, ao difícil acesso. No Sudoeste da Amazônia, os dados *in situ* apresentam falhas de registros frequentes, impossibilitando a realização de estudos hidroclimáticos. A estação fluviométrica situada no rio Xingu (Boa sorte – 18460000), por exemplo, apresenta um total de 36 meses sem registros entre 2003 e 2015. Logo, os dados de Altimetria Especial podem ser uma alternativa para suprir a escassez de dados nessas regiões.

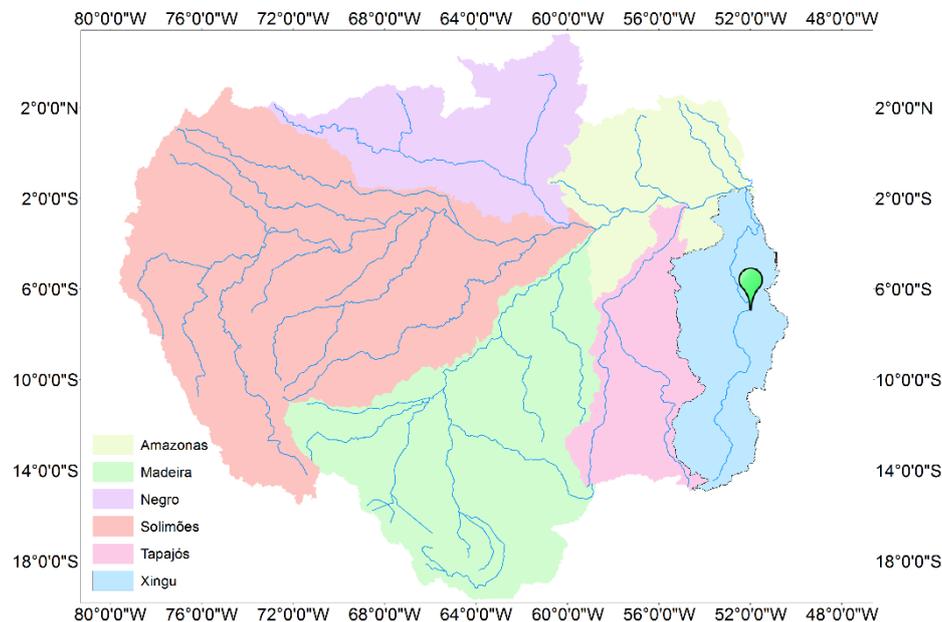
O presente estudo teve como objetivo caracterizar o regime hidrológico do médio Xingu em uma região não monitorada e verificar a correlação entre as anomalias mensais de cota com os índices de TSM. Além disso, foram analisadas as relações dos extremos hidrológicos no rio Xingu com os oceanos adjacentes.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **Área de estudo**

A área de estudo é apresentada na Figura 1, que engloba a sub-bacia do rio Xingu, sobre a Amazônia Oriental. O rio Xingu é um dos principais tributários orientais da bacia Amazônica e drena o Escudo Brasileiro, juntamente com os rios Tocantins, Araguaia, Tapajós e parte da bacia do rio Madeira. O rio Xingu nasce no encontro das Serras Formosa e do Roncador, com altitudes superiores a 600 m. Está dividido basicamente em três compartimentos: Alto Xingu, Médio Xingu e Baixo Xingu. No Alto Xingu, seus principais afluentes são o rio Ferro, o Culuene e o Sete de Setembro. Entra no Parque Indígena do Xingu, onde recebe outros importantes afluentes como o Suiá-Miçu, Manissaua-Miçu e Arraias. No Médio Xingu, recebe entre outras, as contribuições do Rio Fresco, no

município de São Félix do Xingu, e mais a jusante, do Rio Iriri, o afluente mais importante do Xingu (CPRM, 2017).



**Figura 1:** Bacia Amazônica e respectivas sub-bacias. O ícone verde na bacia do Xingu corresponde a região do estudo.

### 3 DADOS ALTIMÉTRICOS

A análise do regime hidrológico foi baseada nos dados de altimetria espacial, entre 2003 e 2015, na região do médio Xingu, provenientes das missões ENVISAT (2003 até 2010), utilizando o algoritmo de FO *Ice-1* e Jason-2 (2008 até 2015). Atualmente esses dados altimétricos estão disponíveis na base de dados HYDROWEB, do site THEIA-CNES: <http://hydroweb.theia-land.fr/?lang=en&>. Esses dados de nível de água estimados são fornecidos por meio de Estações Virtuais (EV), que correspondem ao ponto de cruzamento da passagem do satélite com um corpo hídrico. O termo virtual é utilizado apenas para diferenciá-la de uma estação *in situ*. Para se utilizar as medições desses dois satélites em conjunto, foi necessário realizar uma interpolação dos dados, o que permitiu construir novas séries temporais ao longo dos 12 anos, denominadas neste estudo Estação Virtual Composta (EVC). Para isso, foram escolhidos pontos de cruzamento (PDC) entre as passagens (traços) dos dois satélites, como no exemplo da figura 2 (Silva et al. 2018), ou seja, locais em que existiam traços dos satélites ENVISAT e Jason-2, mais próximos possíveis para que nenhuma mudança hidrológica seja evidenciada (Tabela 1).

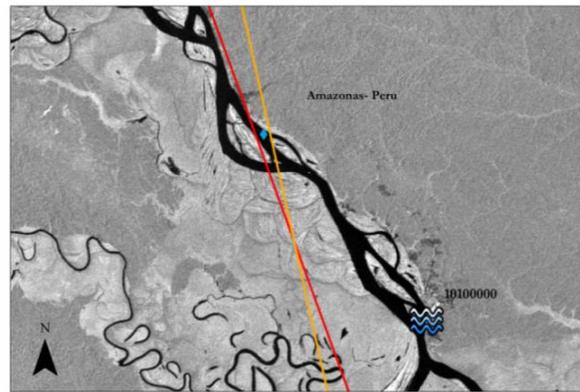


Figura 2. Localização da EVC interpolada no rio Amazonas-Peru (losango azul) e trajetória dos satélites ENVISAT, no senti-do sul-norte, traço 751, em amarelo, e Jason-2, no sentido norte-sul, traço 102, em vermelho, que cruzam o rio Amazonas, respectivamente. A jusante encontra-se a estação fluviométrica 10100000, utilizada para a comparação (distante aproximadamente 29 km), com mosaico da imagem JERS-1 SAR no fundo (Silva et al.2018).

**Tabela 1:** Estações virtuais utilizadas no estudo e suas respectivas distâncias.

Rio	EV ENVISAT	EV Jason-2	Distância EVC (km)
Xingu	048_01	050_02	12

#### 4 DADOS DE PRECIPITAÇÃO E ÍNDICES DE TSM

Os dados de precipitação utilizados neste trabalho são de totais diários de chuva derivados do produto MERGE, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o qual consiste de uma técnica que combina dados de precipitação estimada pelo algoritmo 3B42RT, do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) com dados de precipitação observados, que são reportados em uma base de dados regular pelo Sistema Mundial de Telecomunicações, plataformas de coleta de dados e centros regionais no Brasil (Rozante *et al.*, 2009). O período de estudo compreende de 2003 a 2015.

Os dados de anomalias mensais de TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico foram obtidos do *Climate Prediction Center* (CPC), do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), no período de 2002 a 2016 através do link: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>. Para o Pacífico foi utilizado o índice Nino-3.4, que consiste na anomalia de TSM da região do Central-Leste/Pacífico Tropical, entre 58S e 58N, e 1208 para 1708W. Este índice é calculado utilizando a Interpolação otimizada (OI) da NOAA para TSM, versão 2 (OISSTV2). Para o oceano Atlântico foram utilizados os índices do Atlântico Norte (5-20° Norte, 60-30° Oeste) e Atlântico Sul (0-20° Sul, 30° Oeste-10° Leste).

**5 ANOMALIAS NORMALIZADAS**

Foram calculadas as anomalias normalizadas para todas as variáveis utilizadas no estudo com o objetivo de minimizar as influências das mudanças sazonais, pois a comparação direta dos dados brutos geralmente mostra pouco mais do que a influência dominante do ciclo sazonal (Wilks, 2006). A anomalia normalizada é dada a partir da subtração entre dados brutos  $x$  da média da amostra, dividindo-se pelo desvio padrão da amostra correspondente (Equação 1):

$$z = \frac{x_{i,j} - \bar{x}_{i,j}}{\sigma} \quad (1)$$

**6 CORRELAÇÃO LINEAR E TESTE DE SIGNIFICÂNCIA**

A fim de encontrarmos a correlação entre as anomalias de cotas altimétricas e índices de TSM foram calculadas as correlações lineares. O objetivo da correlação é determinar o grau de relacionamento entre duas variáveis, assumindo valores entre -1 e 1. Para valor negativo assume-se que ocorre correlação negativa e para valores positivos ocorre uma correlação positiva perfeita entre duas variáveis. Sinais contrários ou próximos a 0 indicam pouca ou nenhuma correlação (Costa Neto, 2011). O cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson ( $r$ ) é dado pela Equação 2:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2)$$

onde  $x_i$  e  $y_i$  indicam duas variáveis,  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  a média aritmética de cada série e  $\sigma_x \sigma_y$ , o desvio padrão.

Para comprovar se os coeficientes de correlação entre as anomalias das variáveis são significativos, utilizou-se o seguinte teste de hipóteses (Equação 3):

$$t_0 = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (3)$$

onde,  $t_0$  é a estatística do teste;  $n$  é o tamanho da amostra e  $r$  é a estimativa do coeficiente de correlação linear de Pearson. A significância estatística do cálculo do coeficiente de correlação linear foi estimada através do teste t-Student, com nível de confiança de 95% (Naghetti e Pinto, 2007).

**7 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A Figura 3 apresenta o regime hidrológico a partir de dados altimétricos e precipitação média mensal entre 2003 e 2015 para o médio Xingu. Nota-se que os meses de enchente ocorrem entre fevereiro e abril, com cotas máximas em março, coincidindo com a precipitação máxima. O período menos chuvoso ocorre entre os meses de junho e setembro, mesmo período em que ocorre a vazante,

com cotas mínimas, em setembro. Verifica-se também uma relação muito forte entre a precipitação e os níveis de água neste rio.

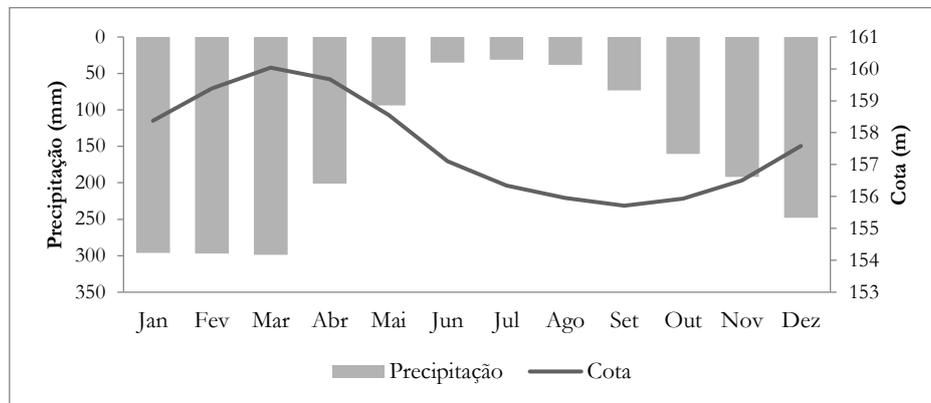


Figura 3 – Cotagrama para o Médio rio Xingu com cotas altimétricas de 2003-2015 utilizando dados dos satélites ENVISAT e Jason-2. A curva climatológica de precipitação foi calculada utilizando dados do Merge.

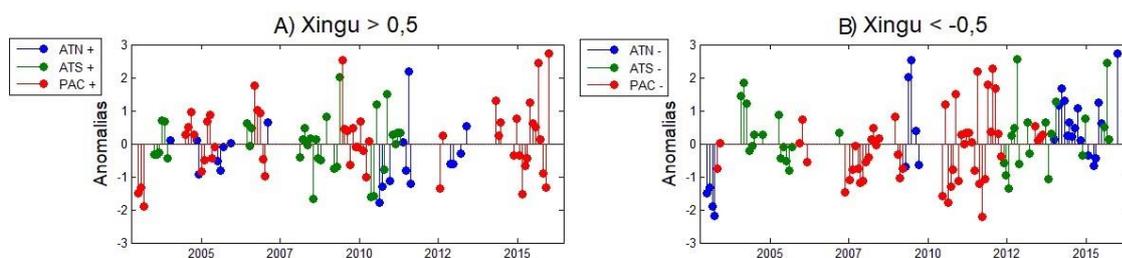
A tabela 2 apresenta os valores de correlação entre anomalias de cota e TSM mensais. Foram utilizados para comparação os índices climáticos de TSM do Atlântico Norte (ATN), Atlântico Sul (ATS) e a região Niño 3.4 do Pacífico, que nada mais são do que as anomalias de TSM médias nestas diferentes regiões. Esses resultados indicam que as anomalias da cota no Médio Xingu apresentam forte correlação negativa nos meses de junho, agosto e dezembro com a condição do ATN e forte correlação negativa com as condições do ATS durante o trimestre JFM. Verifica-se maiores correlações com o Oceano Pacífico nos meses de junho, agosto, setembro e dezembro.

Tabela 2. Correlação mensal entre anomalias de cotas de dados altimétricos no médio Xingu, para cada Oceano considerado no estudo. Valor crítico de  $t_{13; 5\%} = 1,796$ .

Correlação mensal Cotas e TSM - Xingu 39						
Mês	ATN		ATS		PAC	
	r	t-test	r	t-test	r	t-test
Jan	-0,029	-0,097	-0,571	-2,307	-0,345	-1,219
fev	-0,008	-0,025	-0,656	-2,880	-0,213	-0,722
mar	-0,042	-0,140	-0,528	-2,064	-0,341	-1,205
abr	0,214	0,727	-0,163	-0,549	-0,044	-0,145
mai	-0,456	-1,698	0,418	1,527	0,448	1,661
jun	-0,565	-2,272	0,157	0,527	0,515	1,995

jul	0,233	0,796	0,089	0,296	-0,132	-0,441
ago	-0,586	-2,400	-0,430	-1,579	0,927	8,178
set	-0,095	-0,316	-0,093	-0,309	0,517	2,002
out	0,177	0,598	-0,215	-0,729	0,314	1,098
nov	0,218	0,741	0,117	0,390	-0,313	-1,092
dez	-0,469	-1,759	0,049	0,163	0,567	2,282

Nas Figuras 4a e 4b são mostradas as anomalias de níveis de água no Xingu em relação às anomalias de TSM, da região Equatorial do Atlântico Norte, Atlântico Sul e Pacífico, considerando-se apenas valores maiores que 0,5 e menores -0,5, para o período de 2003 a 2015. Durante a cheia de 2009, as anomalias negativas de TSM no ATN podem ter sido determinantes para as anomalias positivas de cota nesta região (Figura 4b). Neste mesmo período o ATS e Pacífico encontravam-se aquecidos (ATS+; PAC+) (Figura 4a). No decorrer da seca de 2010, ocorreram anomalias negativas de cotas (Figura 4a e 4b) relacionadas ao aquecimento anômalo do ATN (ATN+) e ATS (ATS+) para este período. Durante a cheia de 2012, os valores anomalmente positivos de cota foram observados desde o final de 2011 e se estenderam até meados de 2012 (Figura 4b). Esse comportamento da cota na região durante 2011 e 2012 esteve associado, a uma grande variabilidade das condições do oceano Pacífico Equatorial. Destaca-se também, os efeitos da enchente de 2014 (Figura 4a), em que anomalias positivas permaneceram entre 2014 e 2015, associadas principalmente ao resfriamento do ATN, ainda em 2014 (Figura 4b).



**Figura 4** – Anomalias de níveis de água com dados altimétricos no Médio rio Xingu em relação às anomalias de TSM da região equatorial do Atlântico Norte, Atlântico Sul e Pacífico para valores a)  $> 0,5$  e b)  $< -0,5$  de 2003 até 2015.

## 8 CONCLUSÕES

As associações entre a temperatura da superfície do mar dos oceanos Pacífico e Atlântico e as variações das cotas estimadas a partir da técnica de altimetria espacial foram analisadas utilizando-se os dados dos satélites ENVISAT e Jason- 2. Os dados altimétricos representam bem as variações observadas no rio Xingu, tanto em magnitude, como na sua sazonalidade sendo uma ótima alternativa

para regiões de difícil acesso, ou com problemas na qualidade dos dados, fato muito comum em diversas áreas da Amazônia.

O regime hidrológico, neste ponto do rio Xingu, demonstrou ser modal, com dois períodos hidrológicos definidos ao longo do ano, com ascensão e recessão assimétricas. A inundação desenvolve-se a partir do mês de fevereiro até abril com cotas máximas em março, coincidindo com a precipitação máxima, enquanto o período menos chuvoso inicia em julho e se estende até setembro, mês em que apresenta cotas mínimas.

A análise da variabilidade dos níveis do rio Xingu em função das condições oceânicas é extremamente complexa pelo fato deste rio apresentar correlação com os três oceanos ao longo dos meses. De modo geral, em períodos que o ATS se encontra mais frio e o ATN mais quente, os níveis de água aumentam na região em virtude do transporte de umidade proveniente do ATS. Os maiores extremos entre 2003 e 2015 ocorreram em 2009 (cheia), associada ao resfriamento do ATN, e 2014 (cheia) associada, principalmente, ao resfriamento do ATS.

### AGRADECIMENTOS

Este estudo se insere nos projetos de pesquisa Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões-Amazonas (CPRM) e FOAM (CNES/TOSCA). Os autores agradecem   Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de mestrado ao primeiro autor. Ao *Centre de Topographie des Oc ans et de l'Hydrosph re* (CTOH) do *Laboratoire d' tudes en Geophysique et Océanographie Spatiales* (LEGOS), pelos *Geophysical Data Records* (GDR) e as correções troposféricas correspondentes,   *European Space Agency* (ESA), ao *Centre National d'Etudes Spatiales* (CNES), ao Laboratório de Recursos Hídricos e Altimetria Espacial da Amazônia (RHASA) pela garantia do uso dos dados das missões ENVISAT e Jason-2 disponibilizados para o estudo e aos alunos do Laboratório RHASA.

### REFERÊNCIAS

- COSTA NETO, P. L. (2011). *Estatística*. 2<sup>a</sup> edição, São Paulo: Edgard Blucher, 264p.
- CPRM SACE (Sistema de alertas de eventos críticos). (2017). Bacia do rio Xingu – Características. Disponível em:  
[http://www.cprm.gov.br/sace/index\\_bacias\\_monitoradas.php?getbacia=bamazonasAnteriores#](http://www.cprm.gov.br/sace/index_bacias_monitoradas.php?getbacia=bamazonasAnteriores#).  
 Acesso em: 18/01/2017.

ESPINOZA JC. MARENGO JA. RONCHAIL J. MOLINA J., NORIEGA L., GUYOT JL. (2014). The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: The role of tropical-subtropical south Atlantic SST gradient. *Environmental Research Letters*. v. 9, n. 12, p. 124007.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. A. (2007). Correlação e Regressão. In *Hidrologia estatística*. CPRM, 552 p.

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALES, L. G. G.; VILA, D. A. (2009). Combining TRMM and Surface Observation Precipitation: Technique and Validation Over South American. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*, v.1.

SILVA, M. V.; PARIS, A.; CALMANT, S.; CÂNDIDO, L.A.; SILVA, J.S.S. Relationships between pacific and atlantic ocean sea surface temperatures and water levels from satellite altimetry data in the Amazon rivers. RBRH [online]. 2018, vol.23. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2318-03312018000100227&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2318-03312018000100227&lng=pt&nrm=iso)>. Epub 19-Jul-2018. ISSN 1414-381X. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.231820170148>.

YOON, J.-H.; N. ZENG. (2010). An Atlantic influence on Amazon rainfall, *Clim. Dyn.*, 34, 249–264, doi:10.1007/s00382-009-0551-6.

WILKS, D. S.(2006) *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2nd ed. London: Academic Press. 627 p.